

Wirtschaftlichkeitsanalyse von kooperativen fahrbaren Absperrtafeln

FE 03.0541/2015
im Auftrag des
Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen

Dr.-Ing. Matthias Spangler
M.Sc. Frederik Bachmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
Lehrstuhl für Verkehrstechnik, TU München

Dr. Sören Grawenhoff
Marcel Vierkötter
TÜV Rheinland Consulting GmbH

Schlussbericht
November 2018

Inhalt

1	Hintergrund und Zielsetzung	2	A	Anhang: Herleitung von Unfall- und Staukosten.....	12
2	Grundlagen und Vorgehensweise	4	A.1	Unfallkosten im Vorfeld von Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach BVWP.....	12
2.1	Unfallsituation im Bereich von Arbeitsstellen	4	A.1.1	Unfallzahlen im Bereich von AKD in Hessen auf der Basis einer vierjährigen Untersuchung (2006-2009)	12
2.2	Wirkungen kooperativer fahrbarer Absperrtafeln	4	A.1.2	Unfallzahlen mit FAT-Beteiligung auf Basis einer neunjährigen Untersuchung (1997-2005)	12
3	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	6	A.1.3	Unfallkosten nach BVWP	12
3.1	Kostenkomponenten	6	A.1.4	Zeitkosten nach BAST M208	12
3.2	Nutzenkomponenten	6	A.1.5	Unfallkosten pro Unfall mit FAT-Beteiligung	12
3.3	Nutzen-Kosten-Verhältnis	7	A.1.6	Jährliche Kosten durch Unfälle an AKD.....	13
4	Fazit und Ausblick.....	10	A.2	Unfallkosten im Vorfeld von Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach BAST	13
5	Literatur	11	A.2.1	Unfallkosten pro Unfall mit FAT-Beteiligung	13
			A.2.2	Jährliche Kosten durch Unfälle an AKD.....	13

1 Hintergrund und Zielsetzung

2013 haben sich die Verkehrsministerien aus den drei europäischen Ländern Deutschland, Niederlande und Österreich zu der Initiative „Kooperativer ITS Korridor“ (C-ITS Corridor) zusammengeschlossen. Ziel der Initiative ist die Etablierung von V2X-Diensten (kooperative Fahrzeug zu Fahrzeug/Infrastruktur - Dienste) in einem grenzüberschreitenden Streckenzug. Das Projekt sieht vor, in den drei beteiligten Ländern Schritt für Schritt kooperative, intelligente Infrastrukturanwendungen auf Autobahnen einzuführen, um die individuelle Mobilität effizienter, sicherer und umweltfreundlicher zu gestalten. Die erste Anwendung, die in diesem Rahmen zum Einsatz kommt, ist die kooperative fahrbare Absperrtafel (FAT), auch „Baustellenwarner“ genannt, die Verkehrsteilnehmer vor Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD) warnt. Neuwagen verschiedener Fahrzeugserien, die ebenfalls mit dieser Technologie ausgestattet sind, werden damit erstmalig in die Lage versetzt, sicherheitsrelevante Verkehrsinformationen von der straßenseitigen Infrastruktur auf direktem Weg zu erhalten. Die Informationen über

die Baustellen kürzerer Dauer werden den Verkehrsteilnehmern über zwei Wege zur Verfügung gestellt:

- Die fahrbare Absperrtafel strahlt entsprechende Warnmeldungen (Decentralised Environmental Notification Message, DENM) über ETSI ITS G5 (Automotive WLAN, IEEE 802.11.p) direkt an die herannahenden Fahrzeuge aus.
- Die Warnmeldungen über die Arbeitsstellen kürzerer Dauer werden zusätzlich von der Zentrale (ITS Central Station, ICS) über den Mobilitätsdaten Marktplatz (MDM) weiteren Informationsdiensten zur Verfügung gestellt.

Diese Anwendung ist prädestiniert, um den Hintergrund und die Idee von kooperativer Infrastruktur bekannt und populär zu machen, da ihr Nutzen für Verkehrsteilnehmer offensichtlich und nachvollziehbar ist. Auf die Warnung vor AkD sollen dann im weiteren Verlauf der Initiative weitere kooperative Anwendungen, wie die Warnung vor Arbeitsstellen längerer Dauer (AID) und Stauendwarnungen zur verbesserten Verkehrssteuerung, folgen [SAUER ET AL., 2014].

Der Pilotversuch für die infrastrukturseitigen Einrichtungen erfolgt in Hessen. Nach Installation und

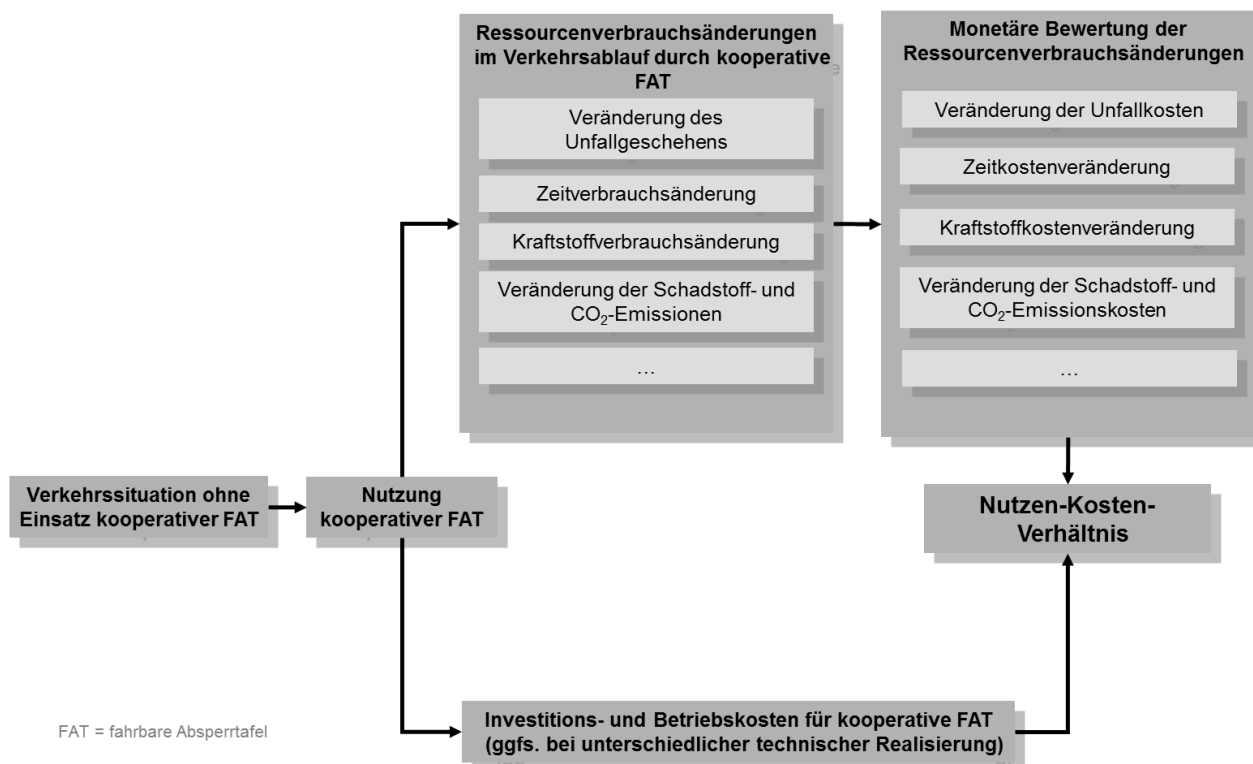


Abbildung 1: Vorgehensweise bei der Kosten-Nutzen-Analyse

ausführlichem Probebetrieb soll eine Ausweitung auf das Digitale Testfeld Autobahn als Teil des Korridors Rotterdam – Frankfurt/M. – Wien erfolgen. Unmittelbar anschließend erfolgt die Umsetzung im übrigen Bundesgebiet.

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse einer durchgeführten Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zur ersten Anwendung des „kooperativen ITS Korridors“, dem Baustellenwarner vor. Ziel der Untersuchung war es festzustellen, ob die Einführung der Anwendung von kooperativen FAT wirtschaftlich sinnvoll ist und welchen Nutzen sie im Vergleich zu den aufzuwendenden Kosten gegebenenfalls erzeugt.

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, wurden für das genannte Ziel Ressourcenverbrauchsänderungen ermittelt und monetarisiert und den durch die Aufrüstung und Betrieb der bestehenden FAT auf kooperative FAT zusätzlichen Kosten gegenübergestellt.

Dazu wurde eine Recherche über in Zusammenhang mit AkD auftretenden Unfällen, Unfallkosten und über die Wirkung von Infrastrukturmaßnahmen auf die Sicherheit und die Effizienz des Verkehrsflusses durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden daraufhin genutzt, um ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) zu ermitteln. Dabei wurde ein Prognosehorizont bis ins Jahr 2032 gewählt.

2 Grundlagen und Vorgehensweise

Diese Untersuchung basiert hauptsächlich auf vorhandenen Studien zu Unfällen im Zusammenhang mit Arbeitsstellen kürzer Dauer (AkD), wie zum Beispiel der vertieften Analyse des Unfallgeschehens aus dem Projekt DIANA2 [ZIMMERMANN & CINDRIC-MIDDENDORF, 2013] oder dem BAST-Bericht V170 „Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen“ [ROOS ET AL., 2008]. Darüber hinaus lieferten die am Pilotversuch in Hessen oder am Digitalen Testfeld Autobahn beteiligten Institutionen und Firmen (Albrecht Consulting, Bundesanstalt für Straßenwesen, Hessen Mobil, TÜV Rheinland Consulting und Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München) Erfahrungswerte und Einschätzungen.

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wurden zunächst Informationen über Kosten für FAT bzw. deren Aufrüstung, um die kooperativen Funktionen abbilden zu können, und das Unfallaufkommen auf Autobahnen, eingeholt. Diese Daten wurden anschließend durch Literaturrecherchen und Aussagen der beteiligten Experten ergänzt.

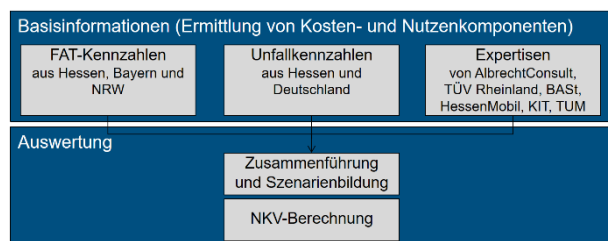


Abbildung 2: Vorgehensweise

2.1 Unfallsituation im Bereich von Arbeitsstellen

Die Recherchen ergaben, dass alleine in Hessen jährlich 92 Unfälle im Vorfeld von AkD auftreten. Die drei häufigsten Unfallmuster (UM) sind demnach:

- UM 1: Auffahren eines Verkehrsteilnehmers auf eine fahrbare Absperrtafel (FAT)
- UM 2: Zusammenprall von Verkehrsteilnehmern innerhalb des Verflechtungsbereiches
- UM 3: Auffahrunfall unter Verkehrsteilnehmern.

Besonders hoch sind hier die Unfallraten bei der Reduzierung der Fahrbahn um zwei Fahrstreifen [ZIMMERMANN & CINDRIC-MIDDENDORF, 2013].

Rechnet man diese Zahl auf Bundesebene hoch, indem man das gleiche Verhältnis ansetzt, das sich bei Unfällen in Arbeitsstellen ergibt (795 Unfälle in Hessen; 7.042 Unfälle in Deutschland jeweils von 2006-2009) so erhält man 815 Unfälle im Vorfeld von AkD pro Jahr. Insgesamt entfallen auf Arbeitsstellen auf deutschen Autobahnen 5% der Unfälle mit Personenschaden und auch 5% der Verunglückten. Laut ADAC gab es 2006 1.738 Unfälle mit insgesamt 21 Toten, 187 Schwerverletzten und 835 Leichtverletzten auf rund 12.500 km Autobahn-Baustellen [ASSENMACHER ET AL., 2008].

Andere Untersuchungen gehen davon aus, dass sich bis zu 7,5 % aller Unfälle auf deutschen Autobahnen im Bereich von Arbeitsstellen zutragen, wobei nur 3% der Gesamtfahrleistung in Arbeitsstellen erbracht werden. Das Risiko in einer Arbeitsstelle längerer Dauer (AID) in einen Unfall verwickelt zu werden liegt 86% höher als in Bereichen außerhalb von Arbeitsstellen. In AkD ist die Gefahr ungefähr zehn Mal so hoch [STÖCKERT, 2001].

2.2 Wirkungen kooperativer fahrbarer Absperrtafeln

Auf deutschen Autobahnen werden jährlich 80.000 bis 137.000 AkD eingerichtet [STÖCKERT, 2001]. Da noch keine belastbaren Erfahrungswerte über die Wirkung bzw. das Unfallvermeidungspotential kooperativer FAT vorliegen, mussten diese abgeschätzt werden. Die im Vorfeld von AkD auftretenden Unfälle lassen sich fast ausschließlich auf fehlerhaftes Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer zurückführen, wofür meist mangelnde Aufmerksamkeit die Ursache ist [ROOS ET AL., 2008]. Durch das frühzeitigere Informieren bzw. Warnen von Fahrern vor Arbeitsstellen werden folgende positive Wirkungen erwartet:

- verbessertes Verkehrs- und Störungsmanagement
- niedrigere Annäherungsgeschwindigkeiten
- geringere Häufigkeit abrupten Bremsens
- erhöhte Aufmerksamkeit

-
- verbessertes Bewusstsein über die Situation der Verkehrsteilnehmer, sowie
 - reduziertes Nachgehen anderer Tätigkeiten der Fahrer [Innamaa et al., 2017].

Befragungen von Kunden von Automobilfirmen haben zusätzlich ergeben, dass kooperative Anwendungen zur Warnung vor Gefahrenstellen, wie beispielsweise Arbeitsstellen auf der Straße, von potentiellen Nutzern als leicht zu bedienen, gut nachzuvollziehen und sinnvoll erachtet werden. Allein 66% der Befragten sagten aus, dass ihre Sicherheit durch solche Warnsysteme verbessert wurde [MALONE ET AL., 2014].

Laut Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wird einer akustischen Warnung von Verkehrsteilnehmern, die sich einer Arbeitsstelle nähern, ein Unfallvermeidungspotential von 30% zugeschrieben [ROOS ET AL., 2008]. Diese Annahme wird durch die Erfahrungen bei den Auswirkungen von Überkopfsignalisierungen auf den Verkehrsablauf und Sicherheit bei AkD unterstützt. Hierbei rechnet man mit einem Reduzierungspotential in Bezug auf Unfallfolgen von sogar 50 bis 100%. Außerdem wurde bei der Wirkungsanalyse festgestellt, dass sich die früher informierten und gewarnten Verkehrsteilnehmer der AkD mit niedrigerer Geschwindigkeit nähern als bei FAT ohne Überkopfsignalisierung. Außerdem wurden Fahrstreifenwechsel früher eingeleitet, als bei konventioneller Absicherung [KEMPER ET AL., 2012].

Die Wirkungen der genannten Anwendungen basieren hauptsächlich auf der früheren und deutlicheren Warnung der Verkehrsteilnehmer vor bevorstehenden Gefahrenstellen. Die Wirkung der kooperativen FAT ist mit den aufgeführten Anwendungen zu vergleichen, weshalb das dort ermittelte Unfallvermeidungspotential von 30% auch für die kooperativen FAT angenommen wird. Da die Warnung bei kooperativen FAT wesentlich früher erfolgt, als bei der akustischen Warnung und somit abrupte Verflechtungs- und Bremsmanöver noch besser vermieden werden können, kann bei kooperativen FAT tendenziell ein noch höheres Vermeidungspotential erwartet werden. Dieser sehr zentrale Wert der Wirkungsabschätzung wurde somit in der vorliegenden Untersuchung eher defensiv angenommen.

3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Die in Kapitel 2 überblicksartig beschriebenen Grundlagen wurden vertieft auf Basis der Literaturrecherche, mit Daten aus Verkehrszentralen und Diskussionen mit Experten aufbereitet. Daraus konnten detaillierte Kosten- und Nutzenkomponenten ermittelt werden. Zum Teil ergaben sich dabei keine festen Werte, sondern mögliche Bereiche. In Abstimmung mit den Experten des Pilotversuchs in Hessen und des Digitalen Testfelds Autobahn wurden daraus die wahrscheinlichsten Werte ermittelt. In Fällen in denen auch durch die Expertenbefragungen keine eindeutigen Werte ermittelt werden konnten, ging die gesamte Bandbreite möglicher Werte in die weiteren Analysen ein.

Im Folgenden sind die verwendeten Werte sowohl auf Kosten- als auch auf Nutzenseite dokumentiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Nutzen-Kosten-Berechnung dargestellt.

Die detaillierte Herleitung der Unfall- und Staukosten kann der Anlage entnommen werden.

3.1 Kostenkomponenten

Die Kostenkomponenten beschreiben die Aufwände, die für die Einrichtung und den Betrieb der kooperativen FAT auf Bundesebene zu erwarten sind. Folgende Werte wurden verwendet:

- Ausstattungskosten für ein kooperatives Modul an einer FAT (ohne Anschaffungskosten für den Warnanhänger)
(Quelle: HessenMobil, 2018)
3.000 [€/Stück]
- Zentralenseitige Kosten für die Aufrüstung einer Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) für kooperative Systeme.
(Quelle: AlbrechtConsult, 2018)
240.000 [€/VRZ]
- 2 Ausstattungsvarianten mit Verkehrsrechnerzentralen
pro Bundesland 0,5 oder 1 [VRZ]

- Allgemeine Betriebskosten des Gesamtsystems entsprechen jährlich 10% der zentralenseitigen Kosten
(Quelle: AlbrechtConsult, 2018)
24.000 [€/VRZ/Jahr]
- Mobilfunkkosten pro FAT und Jahr
(Quelle: HessenMobil, 2018 und ZVM, 2018)
300 [€/FAT/Jahr]
(ab 2020: 180 [€/FAT/Jahr])
- Anzahl der fahrbaren Absperrtafeln in privater und öffentlicher Hand in Deutschland
(Quelle: HessenMobil, 2018)
3.000 [FAT]

Es wird angenommen, dass in den Jahren 2021, 2023, 2025 und 2027 jeweils eine weitere kooperative Funktion eingeführt wird, die sich die zentralenseitigen Einrichtungen zum Teil mit den kooperativen FAT teilen. Für jedes neue System werden dabei Zusatzkosten in Höhe von 20% der zentralenseitigen Ersteinrichtung in VRZ angesetzt. Die verkehrlichen und sicherheitsrelevanten Wirkungen dieser Systeme werden jedoch nicht betrachtet, da sie nur schwer abzuschätzen wären. Da diese Wirkungen positiv wären, würde das Nutzen-Kosten-Verhältnis mit ihrer Berücksichtigung größer ausfallen.

Für die einmaligen Investitionen wird mit einem Abschreibungszeitraum von 10 Jahren und einer jährlichen Aufzinsung von 2% gerechnet.

3.2 Nutzenkomponenten

Der wesentliche volkswirtschaftliche Nutzen von kooperativen FAT ergibt sich aus der erhöhten Verkehrssicherheit und der damit einhergehenden Einsparung von unfallbezogenen Kosten sowie der Reduktion von Verlustzeiten aufgrund von aus Unfällen resultierenden Staus.

Zur Ermittlung von unfallbezogenen Kosten sind verschiedene Modelle zur Kostenschätzung verfügbar. Die in Deutschland gebräuchlichen und für die vorliegende Untersuchung in Frage kommenden werden normal für den Bundesverkehrswegeplan (BVWP) [DAHL ET AL., 2016] und für Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [BAUM ET AL., 2010] verwendet.

Die beiden Modelle unterscheiden sich in Ihrer methodischen Basis. Während das Modell der BASt nur von den direkten Schadenskosten ausgeht, wird im Modell für den BVWP zusätzlich ein Risikowert angesetzt, der abschätzt, welchen Wert die Unversehrtheit von Verkehrsteilnehmern einnimmt. Da sich die Kostensätze der beiden Modelle deutlich unterscheiden (siehe Tabelle 3-1), wurden in dieser Untersuchung beide Modelle verwendet.

Zusammen mit der jährlichen Anzahl an Unfällen im Vorfeld von AkD, die von ZIMMERMANN UND CINDRICH-MIDDENDORF [2013] bestimmt wurden und einem angenommen Unfallvermeidungspotential von 30%, das in Anlehnung an die Werte für akustische Warnungen im Rahmen des Bericht BASt V170 [ROOS ET AL., 2008] gewählt wurde, kann somit das Kosteneinsparungspotential sowohl pro Unfall als auch pro Jahr ermittelt werden.

Tabelle 3-1: Kostensätze BVWP [DAHL ET. AL., 2016] und BASt [2017]

	BVWP	BASt
Methodische Basis	Schadenskosten + Risk Value	Schadenskosten
Getöteter	2.480.996€	1.191.937 €
Schwerverl.	287.635€	123.510 €
Leichtverl.	18.020€	5.139€
Schwerer Sachs.	19.741€	22.369€
Leichter Sachs.	5.826€	6.208€

Die Staukosten, die an Arbeitsstellen kürzerer Dauer entstehen, wurden in einer Untersuchung der Bundesanstalt für Straßenwesen ermittelt [BAUM ET AL., 2010] und für diese Untersuchung übernommen.

Folgende Werte wurden verwendet bzw. ermittelt:

- Unfallkosten im Vorfeld von Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach BVWP
57.043.087 [€/Jahr]
- Unfallkosten im Vorfeld von Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach BASt
19.258.944 [€/Jahr]
- An Arbeitsstellen kürzerer Dauer entstehende Staukosten aufgrund von Unfällen (in Unfallkosten nach BVWP und BASt enthalten)
5.824.003 [€/Jahr]

- Anzahl der Unfälle im Vorfeld von Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Deutschland pro Jahr
3.260 [Unfälle]
- Angenommenes Unfallvermeidungspotential durch kooperative fahrbare Absperrtafeln bei ausgestatteten Fahrzeugen
30 [%]

In dieser Berechnung wurden folgende Faktoren mangels belastbarer Werte nicht berücksichtigt:

- Synergieeffekte durch künftige intelligente Verkehrssysteme (IVS) (z.B.: Stauendwarnung, Falschfahrerwarnung)
- Wachsender Anteil automatisierter Fahrzeuge im Verkehr
- Indirekte Beeinflussung von Verkehrsteilnehmern ohne kooperative oder vernetzte Fahrzeuge
- Harmonisierungseffekte und Routenbeeinflussungen (werden erst beim Einsatz im Rahmen von Arbeitsstellen längerer Dauer erwartet)

Diese nicht berücksichtigten Faktoren reduzieren das Unfallrisiko weiter, wodurch ein zusätzlicher Anstieg des NKV zu erwarten ist.

3.3 Nutzen-Kosten-Verhältnis

Die zeitabhängige Berechnung des Verhältnisses der in 3.1 und 3.2 beschriebenen Nutzen- und Kostenkomponenten erfordert die Kenntnis des Anteils an Fahrzeugen, die Informationen des Systems verarbeiten können.

Zum einen können kooperative Fahrzeuge unmittelbar mit den FAT kommunizieren und zeigen Warnungen direkt an. Zum anderen können auch Fahrzeuge ohne diese technische Ausstattung über andere Wege Informationen erhalten (z.B. über den MDM) und darstellen. Beide Fahrzeugkategorien werden sowohl getrennt als auch zusammen („hybrid“) betrachtet, da sie sich im Empfangen und Verarbeiten der Informationen unterscheiden.

Die verwendeten Durchdringungsraten sind in Tabelle 3-2 dargestellt. Die Werte der Szenarien wurden wie folgt ermittelt:

- „kooperativ“: übernommen aus [ALBRECHT ET AL., 2018]
- „vernetzt“: übernommen aus BAST [2016]
- „hybrid“: berechnet aus „kooperativ“ und „vernetzt“, wobei alle kooperativen Fahrzeuge auch in der Kategorie vernetzt enthalten sind und lediglich 50% der ausschließlich vernetzten Fahrzeuge eine Warnung anzeigen.
 $hybrid=kooperativ+50\%(vernetzt-kooperativ)$

Tabelle 3-2: Durchdringungsraten von Fahrzeugen mit Empfang von FAT-Warnungen

Szenario	2018	2020	2025	2030
kooperativ	1%	10%	41%	76%
vernetzt	20%	34%	70%	95%
hybrid	11%	22%	56%	86%

Während bis zum Jahr 2025 nach BVWP-Kostensätzen ohne kooperative FAT bundesweit Unfall- und Zeitkosten in Höhe von etwa 2,8 Milliarden Euro auflaufen, würden davon nach dem Szenario „hybrid“ etwa 87,5 Millionen Euro eingespart. Davon entfallen etwa 91,7% (80,2 Millionen Euro) auf Personenschäden, 5,0% (4,4 Millionen Euro) auf Sachschäden und 3,3% (2,9 Millionen Euro) auf vermiedene Stauzeiten.

Dem gegenüber stehen Kosten in Höhe von etwa 25,5 Millionen Euro für Errichtung und Betrieb des Dienstes kooperative FAT im Szenario mit 16 Zentralen. Davon entfallen etwa 39,6% (10,1 Millionen Euro) auf den Betrieb, 31,4% (8,0 Millionen Euro) auf die Aufrüstkosten der FAT, 19,7% (5,0 Millionen Euro) auf die Kommunikationskosten und 9,3% (2,4 Millionen Euro) auf zentralenseitige Kosten.

Die resultierenden Nutzen-Kosten-Verhältnisse (NKV) der drei Durchdringungsszenarien sind in den Diagrammen in Abbildung 3 für die Jahre 2018 bis 2032 dargestellt. Dabei wurde nach der Anzahl der erforderlichen Zentralen (0,5 oder 1 Zentrale je Bundesland) und zwischen den Unfallkostensätzen nach BAST und BVWP unterschieden. Zusätzlich wurde jeweils ein Mittelwert über alle vier Kombinationen ermittelt.

Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der erforderlichen Verkehrsrechnerzentralen nur einen relativ geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Die unterschiedlichen Unfallkostenmodelle schlagen

sich, wie bereits in 3.2 erwähnt, sehr stark in den Ergebnissen nieder.

Trotzdem werden in allen Szenarien nach einer gewissen Hochlaufzeit deutlich positive NKV erreicht. Bei Vollausrüstung würde zum Ende des Prognosehorizonts (2032) im Mittel ein NKV von 5,0 erreicht (nach BVWP: 7,3 bis 7,6; nach BAST: 2,5 bis 2,6).

Nach BVWP-Unfallkosten wird im Szenario „vernetzt“ bereits im Jahr 2019 ein NKV größer als 1,0 erreicht. Im Mittel aller Szenarien ist dieses positive NKV spätestens 2023 übertroffen. Innerhalb der ersten zehn Jahre nach der Einführung der kooperativen FAT überschreiten sämtliche Szenarien ein NKV von 4,0 nach BVWP; beim ungünstigeren Modell nach BAST wird nach zehn Jahren ein NKV von 2,0 erreicht oder überschritten.

Sämtliche Szenarien weisen den kooperativen FAT somit eindeutig positive Wirtschaftlichkeit nach.

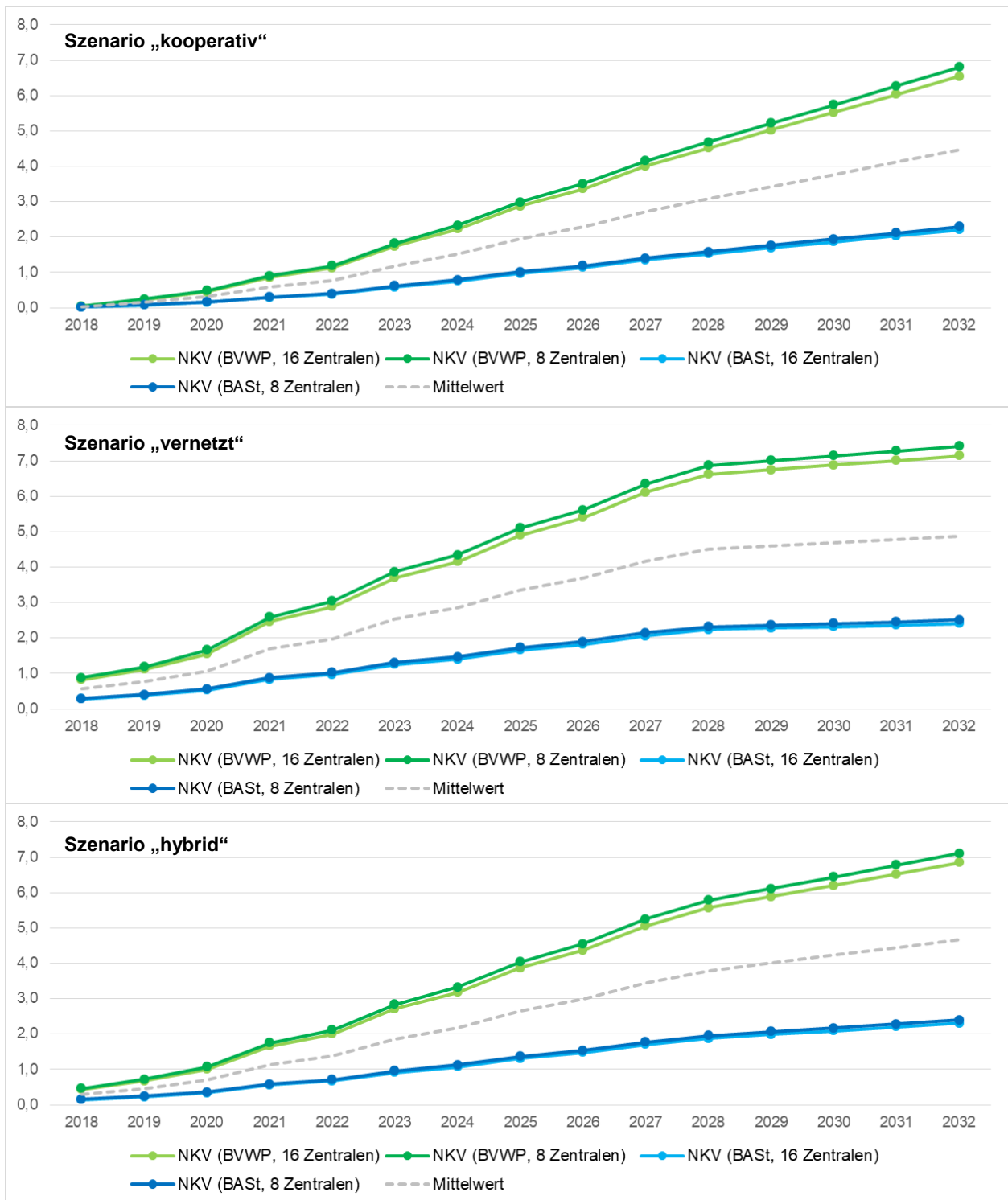


Abbildung 3: Zeitabhängige Nutzen-Kosten-Verhältnisse des Baustellenwarners für die Szenarien „kooperativ“ (oben), „vernetzt“ (Mitte) und „hybrid“ (unten)

4 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Wirtschaftlichkeit der kooperativen FAT ermittelt. Grundlage waren dabei Rechercheergebnisse vorhandener Studien und Erfahrungen zu Kosten und Nutzen des Systems. Bei Vorliegen mehrerer Werte für eine Aussage wurde dabei jeweils der konservativere gewählt, so dass die Ergebnisse der Nutzen-Kosten-Berechnung auf der „sicheren“ Seite und die tatsächlichen NKV-Werte über den ermittelten liegen dürften. Da der wesentliche Nutzen des Systems in der Unfallvermeidung liegt und für die Monetarisierung dieses Effekts zwei stark voneinander abweichende Modelle Anwendung finden, wurden beide Modelle für die Berechnung der Ergebnisse verwendet.

Alle Ergebnisse weisen dem System der kooperativen fahrbahnen Absperrtafel sehr positive NKV aus:

- $NKV > 1,0$ je nach Szenario ab 2019, im Mittel aller Szenarien ab 2023
- $NKV > 4,0$ spätestens zehn Jahre nach Einführung (nach BVWP-Unfallkosten)
- $NKV > 2,0$ spätestens zehn Jahre nach Einführung (nach BAST-Unfallkosten)
- $NKV = 5,0$ bei Vollausstattung aller Fahrzeuge (nach BVWP: 7,3 bis 7,6; nach BAST: 2,5 bis 2,6)

Die Wirtschaftlichkeit des Systems ist damit gegeben.

Zukünftig ist mit der Einführung weiterer kooperativer Dienste zu rechnen (z.B. Stauendwarnung, Falschfahrerwarnung), die eine zunehmende Akzeptanz und direkte Synergieeffekte für die Warnung mittels kooperativer FAT bedeuten werden. Diese Dienste werden den Nutzen der einzurichtenden kooperativen Verkehrszentralen und die Attraktivität des MDM steigern.

In den vorliegenden Auswertungen unberücksichtigt ist der künftig zu erwartende steigende Anteil an automatisierten Fahrzeugen. Diese Fahrzeuge werden eine direktere Reaktion und damit eine bessere Wirkung auf Warnmeldungen erzeugen. In der Zwischenzeit ist davon auszugehen, dass auch nicht ausgestattete Fahrzeuge indirekt positiv beeinflusst werden.

5 Literatur

- ALBRECHT, H.; AL-GAZALI, O.; GABLONER, S.; SCHULZ, W.H. [2018]: Untersuchung zum Marktdesign kooperativer Systeme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der Bundestanstalt für Straßenwesen, FE 82.0571/2012.
- ASSENMACHER, S.; NEUHERZ, M.; OBERT, G. [2008]: DIWA - Direkte Warnung und Information für Autofahrer. Schnellere und genauere Warnung für Autofahrer durch digitalen Rundfunk. Projektbericht.
- BAST [2016]: Jahresbericht 2015 / 2016. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft A38.
- BAST [2017]: Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland - 2015. Abgerufen unter www.bast.de am 23.01.2018.
- BAUM, H.; KRANZ, T.; WESTERKAMP, U. [2010]: Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M208.
- DAHL, A.; KINDL, A.; WALTHER, C.; PAUFLER-MANN, D.; ROOS, A.; WAßMUTH, V.; WEINSTOCK, F.; RÖHLING, W.; MANN, H.-U. [2016]: Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Bericht zum FE-Projekt-Nr. 97.358/2015 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- GEISTEFELDT, J.; LOHOFF, J. [2011]: Stausituation auf den Autobahnen in Nordrhein-Westfalen. Studie im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Ruhr Universität Bochum.
- INNAMAA, S.; KOSKINEN, S.; KAUVU, K. [2017]: Nordic Way. Evaluation Outcome Report Finland
- KEMPER, D.; OESSER, M.; BAIER, M.M.; KLEMPES-KOHNEN, A.; KATHMANN, T.; ROGGENDORF, S. [2012]: Auswirkungen von Überkopfsignalisierungen auf Verkehrsablauf und Sicherheit bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer. Schlussbericht.
- MALONE, K.; RECH, J.; HOGEMA, J.; INNAMAA, S.; HAUSBERGER, S.; DIPPOLD, M.; VAN NOORT, M.; DE FEIJTER, E.; RÄMÄ, P.; AITTONIEMI, E.; BENZ, T.; BURCKERT, A.; ENIGK, H.; GIOSAN, I.; GOTSCHOL, C.; GUSTAFSSON, D.; HEINIG, I.; KATSAROS, K.; NEEF, D.; OJEDA, L.; SCHINDHELM, R.; SÜTTERLEIN, C.; VISINTAINER, F. [2014]: Drive C2X - Accelerate cooperative mobility. Impact Assessment and User Perception of Cooperative Systems.
- ROOS, R.; ZIMMERMANN, M.; CYPRA, T.; RIFFEL, S.B. [2008]: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V 170.
- SAUER, K.; LOTZ-KEENS, C.; HERB, T. [2014]: Einführung kooperativer Systeme in Deutschland (C-ITS Corridor). In: *Straßenverkehrstechnik* (10).
- SCHULZ, W.H.; JOISTEN, N.; MAINKA, M. [2013]: Wirkungen von sim^{TD} auf die Verkehrssicherheit und die Verkehrseffizienz. Deliverable D5.5: TP5-Abschlussbericht -Teil B-1B des Forschungsprojekts Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland. Version 1.0 vom 24.06.2013.
- STÖCKERT, R. [2001]: Auswirkungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes. Darmstadt.
- ZIMMERMANN, M.; CINDRIC-MIDDENDORF, D. [2013]: Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Bezug zu Verkehrsleistung und Arbeitsstellendauer. In: *Straßenverkehrstechnik* (9), S. 18–28.

A Anhang: Herleitung von Unfall- und Staukosten

Im Kapitel 3.2 wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit die Unfallkosten im Vorfeld von AkD und die Staukosten aufgrund von Unfällen an AkD nur aggregiert aufgenommen. Im Folgenden werden die zugrundeliegenden Werte und Berechnungsschritte dazu dargestellt.

A.1 Unfallkosten im Vorfeld von Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach BVWP

A.1.1 Unfallzahlen im Bereich von AkD in Hessen auf der Basis einer vierjährigen Untersuchung (2006-2009)

Tabelle A-1: Unfallzahlen im Bereich von AkD in Hessen (2006-2009) (Quelle: [ZIMMERMANN UND CINDRIC-MIDDENDORF, 2013])

Unfallmuster 1: Anprall auf Absperrung der AkD	106 Unfälle (26,5 Unfälle/Jahr)
Unfallmuster 2: Zusammenprall bei Verflechtung	144 Unfälle (36 Unfälle/Jahr)
Unfallmuster 3: Auffahren auf andere Fahrzeuge	118 Unfälle (29,5 Unfälle/Jahr)
Gesamt	368 Unfälle (92 Unfälle/Jahr)

A.1.2 Unfallzahlen mit FAT-Beteiligung auf Basis einer neunjährigen Untersuchung (1997-2005)

Tabelle A-2: Anzahl der Unfallfolgen mit FAT-Beteiligung nach Unfallmuster 1 (Quelle: [ROOS ET AL., 2008])

Getötete	21
Schwerverletzte	95
Leichtverletzte	235
Schwere Sachschadensunfälle	101
Leichte Sachschadensunfälle	499
Gesamt	951

A.1.3 Unfallkosten nach BVWP

Unfallkosten nach Unfallfolge

Tabelle A-3: Unfallkosten nach BVWP nach Unfallfolge (Quelle: [DAHL ET AL., 2016]) inklusive Sachschadenskosten (Quelle: [SCHULZ ET AL., 2013])

Je Getötete(m)	2.525.547,00€
Je Schwerverletzte(m)	308.998,00€
Je Leichtverletzte(m)	32.342,00€
Je schwerem Sachschadensunfall	19.741,00€
Je leichtem Sachschadensunfall	5.826,00€

A.1.4 Zeitkosten nach BASt M208

Tabelle A-4: Zeitkosten nach BASt nach Unfallfolge (Quelle: [BAUM ET AL, 2010])

Je Getötete(m)	7.721,87€
Je Schwerverletzte(m)	9.027,27€
Je Leichtverletzte(m)	6.417,88€
Je schwerem Sachschadensunfall	6.953,09€
Je leichtem Sachschadensunfall	0,00€

A.1.5 Unfallkosten pro Unfall mit FAT-Beteiligung

Tabelle A-5: Unfallkosten (inkl. Zeitkosten) pro Unfall mit FAT-Beteiligung nach Unfallmuster

Unfallmuster 1: Anprall auf Absperrung der AkD	103.168,45€
Unfallmuster 2: Zusammenprall bei Verflechtung	25.285,77€
Unfallmuster 3: Auffahren auf andere Fahrzeuge	94.399,13€

(Berechnet aus der Summe der Produkte von Tabelle A-2 und der Summe aus Tabelle A-3 und Tabelle A-4 dividiert durch die Gesamtanzahl aus Tabelle A-2 (Unfallmuster 1) bzw. Multiplikation des Wertes für Unfallmuster 1 mit Kostenfaktoren 0,248 (Unfallmuster 2) bzw. 0,915 (Unfallmuster 3) (Berechnet aus Datensätzen zu [ZIMMERMANN UND CINDRIC-MIDDENDORF, 2013]).

A.1.6 Jährliche Kosten durch Unfälle an AKD

Jährliche Kosten (inkl. Zeitkosten) durch Unfälle an AkD in Hessen: 6.439.825,95€

(Berechnet aus der Summe der Produkte von Tabelle A-1 und Tabelle A-5).

Jährliche Kosten (inkl. Zeitkosten) durch Unfälle an AkD in Deutschland: 57.043.087,26€

(Berechnet aus dem Produkt der jährlichen Kosten durch Unfälle an AkD in Hessen mit dem Quotienten aus Unfällen in Arbeitsstellen in Deutschland (3.260) und Unfällen in Arbeitsstellen in Hessen (368) in den Jahren 2006-2009.)

A.2 Unfallkosten im Vorfeld von Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach BAST

A.2.1 Unfallkosten pro Unfall mit FAT-Beteiligung

Tabelle A-6: Unfallkosten pro Unfall (inkl. Zeitkosten) mit FAT-Beteiligung nach Unfallmuster

Unfallmuster 1: Anprall auf Absperrung der AkD	31.448,31€
Unfallmuster 2: Zusammenprall bei Verflechtung:	13.169,54€
Unfallmuster 3: Auffahren auf andere Fahrzeuge	29.380,91€

A.2.2 Jährliche Kosten durch Unfälle an AkD

Jährliche Kosten (inkl. Zeitkosten) durch Unfälle an AkD in Hessen: 2.174.220,47€

(Berechnet aus der Summe der Produkte von Tabelle A-1 und Tabelle A-6).

Jährliche Kosten durch Unfälle an AKD in Deutschland: 19.258.944,10€

(Berechnet aus dem Produkt der jährlichen Kosten durch Unfälle an AKD in Hessen mit dem Quotienten aus Unfällen in Arbeitsstellen in Deutschland und Unfällen in Arbeitsstellen in Hessen in den Jahren 2006-2009.)